



HAL
open science

Oscillateurs micro-ondes à résonateurs optiques : topologies, performances en bruit et perspectives

Olivier Llopis, Zeina Abdallah, Vincent Auroux, Amel Ali Slimane, Arnaud Fernandez, Jérémy Maxin, Grégoire Pillet, Loïc Morvan

► To cite this version:

Olivier Llopis, Zeina Abdallah, Vincent Auroux, Amel Ali Slimane, Arnaud Fernandez, et al.. Oscillateurs micro-ondes à résonateurs optiques : topologies, performances en bruit et perspectives. Journée du Club Optique Micro-onde 2014 (JCOM 2014), Jun 2014, Lannion, France. 2p. hal-01058007

HAL Id: hal-01058007

<https://hal.science/hal-01058007v1>

Submitted on 25 Aug 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Journée du Club
UMR FOTON
Lannion
19 Juin 2014



Oscillateurs micro-ondes à résonateurs optiques : topologies, performances en bruit et perspectives

O. Llopis¹, Z. Abdallah^{1,2}, V. Auroux^{1,3}, A. Ali Slimane¹, A. Fernandez¹
⁴J. Maxin, ⁴G. Pillet, ⁴L. Morvan

¹ LAAS-CNRS, Université de Toulouse, 7 av. du Colonel roche, 31031 Toulouse

² CNES, Toulouse, ³ OSAT, Toulouse, ⁴ Thales R&T, Palaiseau

llopis@laas.fr

L'oscillateur électro-optique, ou OEO, constitue une des techniques les plus efficaces pour la génération de signaux à très faible bruit de phase aux très hautes fréquences. Ce concept, proposé à l'origine dans les années 1990 par des chercheurs du Jet Propulsion Laboratory [1], a connu dans les années 2000 de nombreuses évolutions et est décliné aujourd'hui dans des topologies très différentes. Les premiers OEOs étaient basés sur des lignes à retard fibrées de plusieurs kilomètres de long. Si leurs performances en bruit étaient relativement bonnes près de la porteuse, ce n'était pas le cas aux fréquences d'offset correspondant à une rotation complète de phase dans la fibre où des raies parasites importantes venaient perturber le signal (ex : tous les multiples de 50 kHz pour 4 km de fibre). Il y avait également un risque de déclenchement d'oscillation parasite sur ces raies, qui pouvait être géré par l'utilisation de plusieurs bobines fibrées. Une seule bobine de plusieurs kilomètres étant déjà volumineuse, ces OEO multi-retards constituaient des systèmes très massifs. Par ailleurs, certains problèmes de bruit dans les lignes à retard fibrées de grande longueur n'ont véritablement fait l'objet d'études exhaustives que tardivement [2].

Les années 2000 ont vu l'arrivée d'un concept différent : celui de l'OEO à résonateur optique. Si le remplacement d'une ligne à retard par un résonateur pouvait sembler évident a priori, la mise en œuvre de cette approche posait néanmoins de nombreux problèmes pratiques. Tout d'abord, contrairement à la ligne à retard, la réponse en amplitude d'un résonateur ne permet pas d'utiliser n'importe quel laser : la fréquence du laser doit correspondre à la fréquence d'une des résonances du résonateur, et il est même nécessaire de verrouiller le couple laser-résonateur afin que cet accord en fréquence soit stable dans le temps. Une fois cette difficulté surmontée, le résonateur peut être utilisé pour filtrer l'onde RF portée par l'optique à l'aide de ses modes latéraux et générer ainsi un retard, à condition toutefois que ceux-ci soient suffisamment proches, c'est-à-dire que l'intervalle spectral libre du résonateur se situe dans la gamme RF ou micro-onde.

Au niveau des résonateurs, le choix est cependant limité car le but est de conserver la performance en bruit de phase, et donc un facteur de qualité Q très élevé. Le lien entre coefficient de qualité et retard peut être établi en comparant les pentes phase-fréquence d'une ligne à retard et d'un résonateur. Par exemple, une fibre optique de 1 km induit un retard de 5 μ s, ce qui est équivalent à un Q de $1.6 \cdot 10^5$ à 10 GHz. Pour obtenir un tel facteur de qualité à 10 GHz avec un résonateur optique, en tenant compte de l'écart de fréquence entre l'optique (194 THz) et les micro-ondes, un résonateur présentant un facteur Q optique de $3 \cdot 10^9$ doit pouvoir être réalisé. Si on monte encore en fréquence, l'exigence sur le résonateur optique sera moindre, ou inversement si les performances du résonateur sont inchangées (ex : Q = $3 \cdot 10^9$), celui-ci pourra fournir une résonance à 100 GHz avec un coefficient de qualité extrêmement élevé (ex : $1.6 \cdot 10^6$), ce qui rend l'approche optique-hyperfréquence particulièrement intéressante pour la génération de signaux en gamme millimétrique.

De tels coefficients de qualité, supérieurs à 10^9 en optique, sont observés dans les anneaux fibrés résonants [3], ou encore dans des géométries de type disque ou sphère supportant des modes de galerie (WGM) [4]. Le verrouillage d'un laser sur une résonance aussi étroite constitue une première difficulté, qui peut être levée par des approches optiques [5] ou une contre réaction électronique [6]. A ce stade, plusieurs topologies d'OEO à résonateurs doivent être distinguées : l'OEO à résonateur passif, l'OEO à résonateur non-linéaire et l'OEO à résonateur actif (ou le laser à modes verrouillés).

Le cas de l'OEO à résonateur passif a fait l'objet de nombreux travaux au LAAS, qu'il s'agisse de résonateurs à boucle fibrée ou de résonateurs WGM. Dans le premier cas, un bruit de phase de -128 dBc/Hz à 10 kHz d'une porteuse à 10.2 GHz a pu être obtenu sur un oscillateur basé sur une



Journée du Club UMR FOTON Lannion 19 Juin 2014



boucle résonante fibrée de 100 m, associé à un plancher de bruit de phase au-delà de 100 kHz proche de -149 dBc/Hz et avec peu de modes parasites (ISL résonateur = 2 MHz), ceci grâce à une étude détaillée du bruit généré dans le résonateur fibré [7]. Dans le deuxième cas, les résultats obtenus ont été plus modestes, principalement à cause de la difficulté de se procurer des disques WGM de très fort coefficient de qualité, ainsi que des difficultés pratiques liées au couplage à une fibre de ces dispositifs. Un bruit de phase de -95 dBc/Hz à 10 kHz d'une porteuse à 12.5 GHz a néanmoins pu être mesuré sur un tel dispositif, pour un résonateur de $Q = 10^8$.

Plus récemment, un résonateur fibré passif a pu être couplé aux lasers bi-fréquence développés par Thales R&T, grâce à un double verrouillage électrique sur deux modes du résonateur. Même si la performance en bruit est plus modeste que dans le cas de l'OEO mono-fréquence, l'avantage de cette approche réside dans la possibilité de réaliser une source accordable avec un pas de fréquence correspondant à l'ISL du résonateur (dans ce cas précis, 8.3 MHz).

Une solution élégante pour générer des signaux micro-ondes avec ce type de résonateur consiste à profiter de la très forte accumulation d'énergie dans le résonateur qui permet la génération d'effets non-linéaires, comme par exemple le mélange quatre ondes. Cette approche permet d'éviter de construire une boucle oscillante micro-onde, le signal de battement optique étant généré directement par le résonateur. D'excellents résultats ont pu être obtenus par la société américaine OEWaves avec cette approche [5], mais elle reste réservée à ce jour aux résonateurs WGM présentant des Q très élevés. D'autre part, nos tentatives pour reproduire cette approche sur des boucles fibrées résonantes se sont à ce jour soldées par un échec, en particulier à cause de l'impossibilité de bloquer d'autres effets non-linéaires comme l'effet Brillouin stimulé.

Enfin, il est possible de travailler avec un résonateur actif, c'est-à-dire une boucle fibrée résonante incluant un amplificateur optique. Cette configuration a été proposée également par le JPL et est connue sous la dénomination de COEO (Coupled Opto-Electronic Oscillator) [8]. L'avantage de cette approche réside dans le fait que le laser et le résonateur sont un seul et même composant, et que donc il est inutile de mettre en place un système de verrouillage de fréquence. L'influence du bruit de l'amplificateur optique sur l'oscillation micro-onde reste néanmoins à quantifier précisément. Avec cette approche, un bruit de phase de -135 dBc/Hz à 10 kHz d'une porteuse à 10 GHz a récemment été mesuré au LAAS, pour un laser fibré comportant une boucle de 400 m de fibre et un amplificateur optique à semiconducteur (SOA).

Références

- [1] X.S. Yao and L. Maleki, "Progress in the optoelectronic oscillator - a ten year anniversary review," 2004 IEEE Microwave Theory and Tech. Symp. Digest, pp. 287-290, 2004.
- [2] O. Okusaga, J. Cahill, W. Zhou, A. Docherty, G.M. Carter, C.R. Menyuk, "Optical scattering induced noise in RF-photonics systems" IEEE-Int. Frequency Control Symposium and EFTF, San Francisco, May 2011.
- [3] O. Llopis, P.H. Merrer, A. Bouchier, K. Saleh, G. Cibiel, "High-Q optical resonators: characterization and application to stabilization of lasers and high spectral purity microwave oscillators", *invited paper*, SPIE Photonics West, San Francisco, Jan. 2010.
- [4] A. Savchenkov, V. Ilchenko, A. Matsko, L. Maleki, "Kilohertz optical resonances in dielectric crystal cavities", *Physical Review A*, 70, 051804(R), Nov. 2004.
- [5] L. Maleki, V.S. Ilchenko, A. A. Savchenkov, W. Liang, D. Seidel, A.B. Matsko, "High performance, miniature hyper-parametric microwave photonic oscillator", 2010 IEEE Int. Freq. Control Symposium (IFCS), pages 558-563, June 2010.
- [6] P.H. Merrer, O. Llopis, G. Cibiel, "Laser Stabilization on a Fiber Ring Resonator and Application to RF Filtering", *IEEE-Photonics Technology Letters*, vol 20, n° 16, July 2008, pp. 1399-1401.
- [7] K. Saleh, O. Llopis, G. Cibiel, "Optical Scattering Induced Noise in Fiber Ring Resonators and Optoelectronic Oscillators", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, no. 9, pp. 1433,1446, May 1, 2013.
- [8] X. S. Yao, L. Davis, L. Maleki, "Coupled Optoelectronic Oscillators for Generating Both RF Signal and Optical Pulses", *Journal of Lightwave Tech.*, jan. 2000, pp. 73-78.